

УДК 621.3.095.3

**ЗМЕНШЕННЯ ОПРОМІНЕННЯ ГОЛОВИ ЛЮДИНИ АНТЕНОЮ  
МОБІЛЬНОГО ТЕЛЕФОНУ<sup>1</sup>**

*Найденко В. І., д. ф.-м. н, професор; Саламатіна Н. І., бакалавр  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна,  
salamatinan@ukr.net*

**REDUCING IRRADIATION HUMAN HEAD BY CELLULAR PHONE ANTENNA**

*Naydenko V. I., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;  
Salamatina N. I., Bachelor  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine,*

**Вступ**

За різними дослідженнями 40 – 60 % від загально випроміненої антеною мобільного телефону енергії поглинається головою людини. Щоб зробити цей вид зв'язку безпечним для здоров'я, необхідно зменшити кількість поглиненої енергії. В [1–3] досліджувалися методи зменшення рівня SAR, а їх фундаментальні переваги були детально розглянуті в [4]. Дослідження зменшення опромінення голови людини в [5] проведено методом компенсації. Суть методу в тому, що між антеною телефону та головою людини встановлено допоміжний випромінювач. У певній точці поля цього допоміжного випромінювача компенсують поле основного випромінювача, а навколо цієї точки утворюватиметься область слабкої напруженості поля.

**Мета статті**

Метою дослідження є знаходження рішення для визначення електромагнітного поля випромінювачів з врахуванням присутності голови користувача, побудова графіків, які показують, що за допомогою методу компенсації можна зменшити опромінення голови.

**Постановка задачі**

Задача визначення електромагнітного поля випромінювачів є надзвичайно складною, оскільки необхідно розв'язати тривимірну векторну задачу. Також необхідно врахувати, що геометричні розміри вібраторів значно менші за розміри голови. Крім того голова є складною за формою та за електромагнітними характеристиками. Для спрощення задачі голову вважаємо однорідною. В такій постановці задачу можна привести до розв'язання системи векторних інтегральних рівнянь четвертого порядку

---

<sup>1</sup> Електронний варіант статті: <http://radap.kpi.ua/index.php/radiotechnique/article/view/825>

для струмів на поверхнях вібраторів і голови. Рішення такої задачі є достатньо складною проблемою. Тому вводяться наступні наближення. Задача розбивається на дві задачі. Перша задача – знаходження амплітуд струмів на вібраторах як результат рішення задачі дифракції плоскої електромагнітної хвилі паралельної поляризації на системі чотирьох нескінченних циліндрів. Три з них – вібратори, четвертий – голова. Ця задача є двовимірною, що значно спрощує її рішення. Друга задача – це знаходження полів при

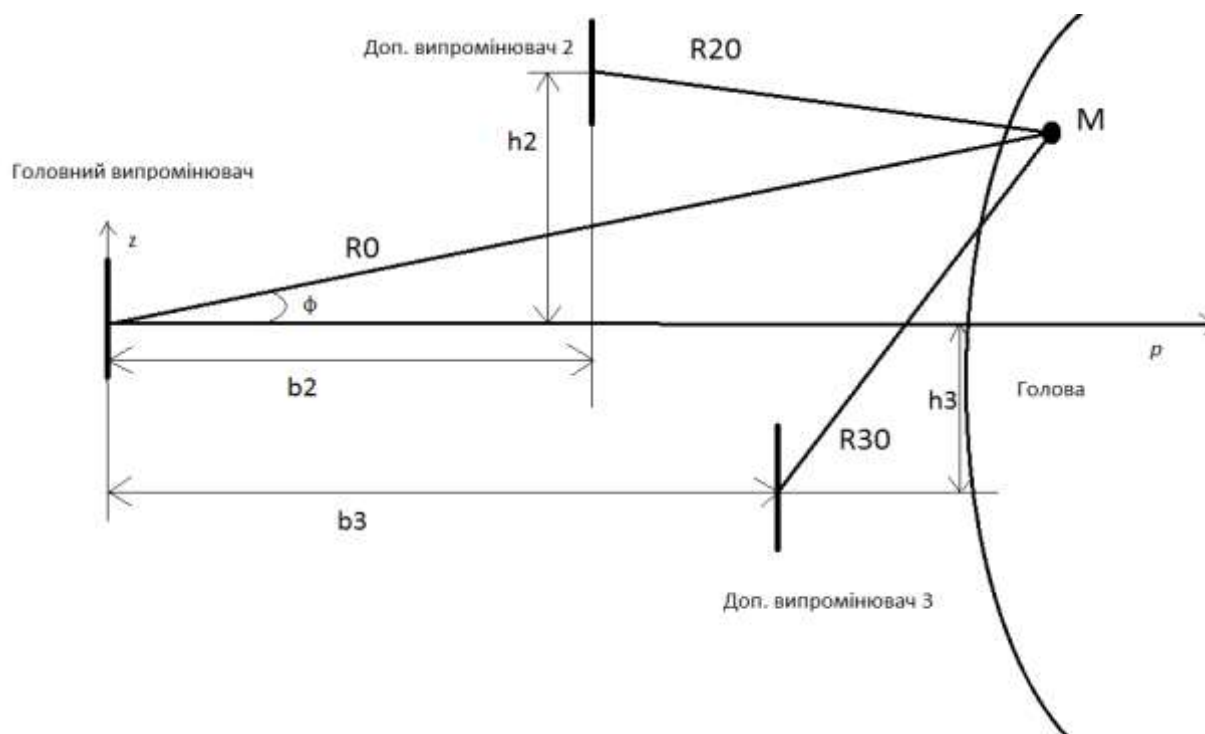


Рис. 1. Розташування випромінювачів відносно голови

знайдених в першій задачі струмах. Рішення другої задачі відомо в літературі.

Геометрія задачі показана на рис. 1.

### Визначення напруженості електричного поля

Формули для знаходження напруженості електричного поля вібраторів наведені в [6]. Ці формули дійсні для синусоїдального розподілу струму на поверхні вібраторів і за умови нехтування азимутальним струмом.

$$E_z = -j \frac{J_0}{4\pi} \left[ \frac{\exp(-jkR_1)}{R_1} + \frac{\exp(-jkR_2)}{R_2} - 2 \cos kL \frac{\exp(-jkR_0)}{R_0} \right]$$

$$E_\rho = E_y = \frac{J_0 j}{4\pi y} \left[ \frac{(z-L) \exp(-jkR_1)}{R_1} + \frac{(z+L) \exp(-jkR_2)}{R_2} - 2z \cos kL \frac{\exp(-jkR_0)}{R_0} \right]$$

Оскільки компенсації підлягає напруженість електричного поля, то напруженість магнітного поля не наводимо. Вирази для полів наведені в

циліндричній системі координат.

### **Постановка задачі знаходження струмів**

В строгому плані задача знаходження амплітуд струмів зводиться до розв'язку системи з п'яти інтегральних рівнянь для електричного поля (EFIE). Цей метод знаходження струмів є точним в сенсі постановки, але вимагає великих затрат часу. Інші методи, наприклад, метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, варіаційні методи, метод моментів також є складними. Конкретні результати отримуються в чисельному вигляді, який складний для аналізу. Тому розглянемо простіший варіант знаходження струмів.

Згадаємо, що для рішення першої задачі потрібні лише амплітуди струмів. Далі, оскільки поперечні розміри вібраторів значно менші за довжину хвилі і необхідні лише амплітуди струмів, можемо замінити вібратори стрічкового перерізу на вібратори круглого перерізу. І нарешті, довжини вібраторів вважаємо необмеженими а голову представляємо як циліндр круглої форми також необмеженої довжини (висоти). Тоді можна сформулювати задачу знаходження амплітуд струмів як задачу дифракції плоскої електромагнітної хвилі паралельної поляризації, що падає під довільним кутом на чотири циліндри, три з яких ідеально провідні, а четвертий має електромагнітні параметри, властиві загально прийнятим для голови в даному діапазоні частот. З рішенням цієї задачі будуть знайдені амплітуди струмів, які будуть використані для знаходження полів.

### **Задача дифракції**

Шукані поля дифракційної задачі мають задовольняти рівнянням Максвелла та граничним умовам. Запишемо формули для напруженості електричних полів кожного циліндру. Поздовжні компоненти напруженості електричного поля, збуджуваного кожним з трьох циліндрів

$$E_{z1} = \sum_{-\infty}^{\infty} (-i)^n a(n) H_n^1(kr_1) e^{in\varphi_1}, \quad (1)$$

$$E_{z2} = \sum_{-\infty}^{\infty} (-i)^n b(n) H_n^1(kr_2) e^{in\varphi_2}, \quad (2)$$

$$E_{z3} = \sum_{-\infty}^{\infty} (-i)^n c(n) H_n^1(kr_3) e^{in\varphi_3}. \quad (3)$$

Оскільки голова – це діелектричний циліндр, то потрібно розглядати поля як ззовні циліндра, так і всередині нього, тобто поля, що розсіюються та поглинаються циліндром. Поза головою:

$$E_{z4m} = \sum_{-\infty}^{\infty} (-i)^n \cdot d(n) \cdot H_n^2(kr_4) e^{in\varphi_4} \quad (4)$$

Всередині голови:

$$E_{z44p} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n \cdot h(n) \cdot J_n(k_1 \cdot r_4) e^{in\varphi_4}. \quad (5)$$

Граничні умови для перших трьох циліндрів, які вважаються ідеально провідними, можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} E_{z11} + E_{z12} + E_{z13} + E_{z14m} + E_{01} &= 0, \\ E_{z21} + E_{z22} + E_{z23} + E_{z24m} + E_{02} &= 0, \\ E_{z31} + E_{z32} + E_{z33} + E_{z34m} + E_{03} &= 0. \end{aligned}$$

Граничні умови для четвертого циліндру:

$$\begin{aligned} E_{z41} + E_{z42} + E_{z43} + E_{z44m} - E_{z44p} + E_{04} &= 0, \\ H_{z41} + H_{z42} + H_{z43} + H_{z4m} - H_{z4p} + H_0 &= 0. \end{aligned}$$

Тут  $E_{zij}$  – напруженості електричного поля, що розсіюється першим, другим та третім циліндрами,  $E_{z44m}$  – напруженість електричного поля, що розсіюється четвертим циліндром,  $E_{z44p}$  – напруженість електричного поля всередині четвертого циліндру.

Поля кожного циліндру (1) – (5) записані у власній системі координат. Для виконання граничних умов ці поля потрібно записати в системі координат кожного іншого циліндра. Щоб записати вираз для напруженості одного циліндру в системі координат іншого, необхідно скористатися теоремою додавання для циліндричних функцій [7]:

$$e^{vi\varphi} J_v(w) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_{v+m}(Z) J_m(z) e^{mi\theta}$$

де  $w = \sqrt{Z^2 + z^2 - 2Zz \cos \theta}$ .

Для прикладу запишемо поле, яке розсіюється третім циліндром в системі координат першого циліндру:

$$E_{z13} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n c(n) \sum_{m=-\infty}^{\infty} H_{n+m}^2(k \cdot r_{31}) J_m(k \cdot r_1) e^{mi\varphi_1}. \quad (6)$$

Підставляємо вирази для поздовжніх компонент електричного поля типу (6) в граничні умови. Маємо систему з п'яти груп рівнянь з 5 групами невідомих  $a(n)$ ,  $b(n)$ ,  $c(n)$ ,  $d(n)$ ,  $h(n)$ .

### Система лінійних алгебраїчних рівнянь

Отримані рівняння є рядами Фур'є по азимутальним гармонікам на одному і тому інтервалі  $0 \div 2\pi$ . Тому можемо прирівняти доданки, що відповідають окремим азимутальним гармонікам. Значення  $m$  та  $n$  можуть бути від мінус нескінченності до плюс нескінченності, тобто маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь необмеженого порядку. Взагалі рішення таких систем невідоме. На практиці обмежуються певними значеннями  $m$  та

$n$ , перетворюючи цю СЛАР на СЛАР обмеженого порядку. Наприклад, візьмемо  $n, m$  рівними  $-2, -1, 0, 1, 2$ . Тоді отримаємо СЛАР 25 порядку. Похибка, викликана обмеженням порядку, може бути визначена порівнянням амплітуд, знайдених рішенням СЛАР різних порядків.

Порівнюємо похибку визначення  $b_0$ . Для СЛАР 15 порядку  $b_0=0.397$ , для СЛАР 25 порядку  $b_0=0.431$ . Похибка визначення  $a_0$  приблизно така ж. Похибки визначення амплітуд з іншими індексами більші, але в другій частині задачі, як буде показано далі, потрібні будуть лише основні амплітуди. Вважатимемо достатньою СЛАР 15 порядку.

Знайдемо напруженості магнітних полів трьох циліндрів:

$$\begin{aligned}H_1(\varphi_1) &= \frac{1}{\mu_0} \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} (-i)^n a(n) \cdot H_n'(k \cdot r_1) e^{ni\varphi_1}, \\H_2(\varphi_2) &= \frac{1}{\mu_0} \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} (-i)^n b(n) \cdot H_n'(k \cdot r_2) e^{ni\varphi_2}, \\H_3(\varphi_3) &= \frac{1}{\mu_0} \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} (-i)^n c(n) \cdot H_n'(k \cdot r_3) e^{ni\varphi_3}.\end{aligned}$$

За законом повного струму знаходимо амплітуди струмів:

$$\oint H dl = I$$

Оскільки  $\int_0^{2\pi} e^{im\varphi} d\varphi = 0$ , якщо  $m \neq 0$ , то амплітуди струмів будуть ви-

значатися амплітудами розкладу лише з нульовими індексами.

### **Аналіз результатів**

За основний результат приймемо залежність відношення сумарного поля трьох вібраторів до поля головного вібратора. Тобто, вісь координат буде показувати, яку частину поля головного випромінювача становить сумарне поле вібраторів. Наприклад, мінімальне значення відношення на рис. 2. приблизно 0.2, це означає, що опромінення максимально може бути зменшено в 4 рази. Можемо визначити розмір області, в якій опромінення буде зменшено в 4 рази. Цей розмір знаходиться як різниця між точками перетину рівня 0.25 з графіком функції; отримуємо 0.94 см. На наступному рисунку максимально опромінення можна зменшити приблизно в 14 разів в області, розмір якої буде дорівнювати 0.4 см. Для порівняння розмір області, в якій опромінення буде зменшено в 4 рази – 2.47 см. На рис. 4. бачимо, що максимально опромінення може буде зменшено в 25 разів в області з розміром 0.4 см. Розмір області, в якій опромінення буде зменшено в 4 рази – 2.48 см. На рис. 5 опромінення може буде зменшено максимум в 50 разів в області з розміром 0.1 см. Розмір області, в якій опромінення буде зменшено в 4 рази – 2.6 см. Це найкращий з наведених результат.

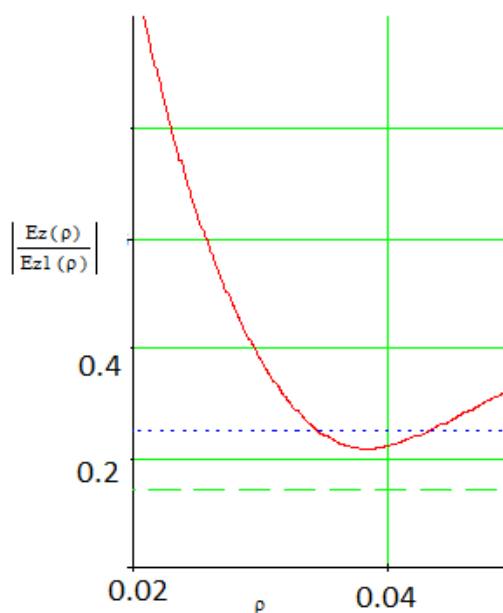


Рис. 2. Відношення полів  
при  $b_2, b_3 = 0.5$  см;  $h_2, h_3 = 9$  см

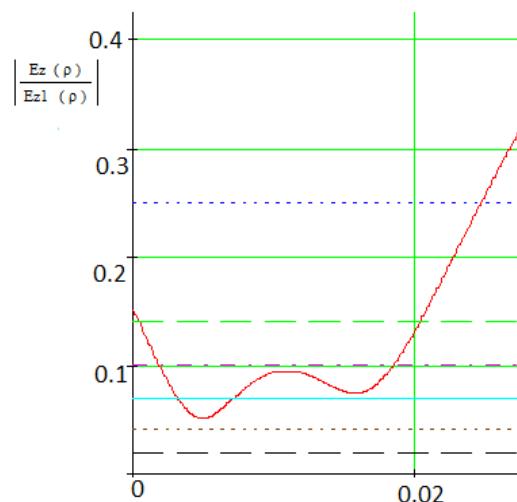


Рис. 3. Відношення полів  
при  $b_2, b_3 = 1$  см;  $h_2, h_3 = 9$  см

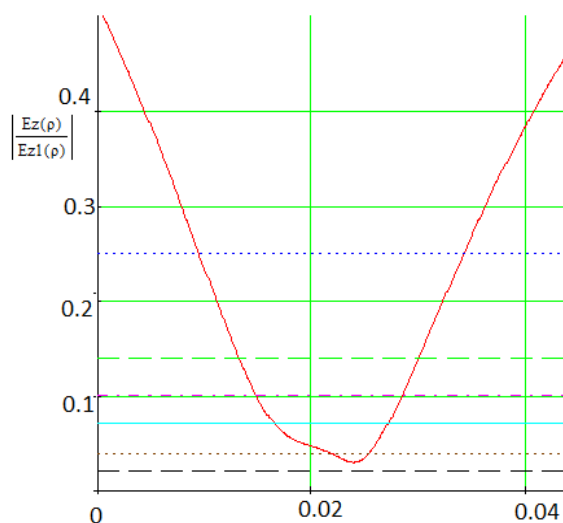


Рис. 4. Відношення полів  
при  $b_2, b_3 = 2$  см;  $h_2, h_3 = 9$  см

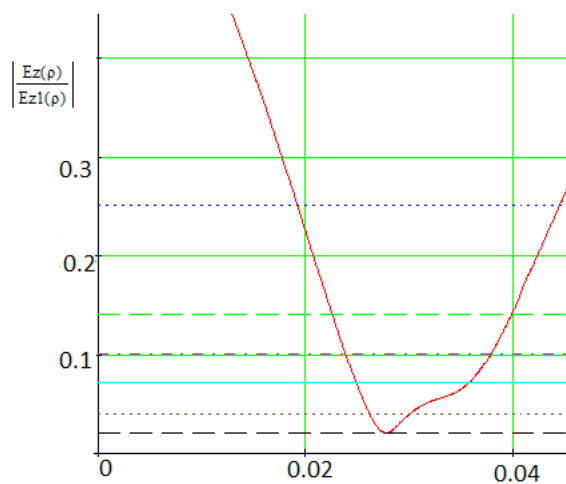


Рис. 5. Відношення полів  
при  $b_2, b_3 = 3$  см;  $h_2, h_3 = 9$  см

### Висновки

Отримані результати показують, що можливо зменшити опромінення голови користувача. Показано, що при допустимих відстанях між основним вібратором та допоміжними темна пляма буде знаходитись в голові, а опромінення частини голови, наближеної до антен, буде зменшено в декі-

лька разів. Темна пляма має достатні розміри, щоб суттєво зменшити навантаження голови.

Дослідження може бути продовжене у напрямку збільшення кількості вібраторів та їх фазування.

#### References

1. Chen H. Y. and Yang H. (2004) SAR affected by shapes and electrical properties of the human head exposed to the cellular phone. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 42, No. 1, p. 1-4.
2. Yoshida K. A., Hirata A., Kawasaki Z. and Shiozawa T. (2005) Human head modeling for modeling for handset antenna design at 5 GHz band. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 19, No. 3, p.401-411.
3. Mahmoud K. R., El-Adawy M., Ibrahim S. M. M., Bansal R. and Zainud-Deen S. H. (2008) Investigation the interaction between a human head and smart handset for 4 GHz communication systems. *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 2, p.169-188.
4. Bank M. and Levin B. (2007) The development oh the Cellular Phone Antenna with a Small Radiation of Human Organism Tissues. *IEEE Antenna Propagation Magazine*, Vol. 49, No. 4, pp. 65-73.
5. Levin B., Haridim M. and Bank M. (2013) Cellular phone Antenna with a Small Irradiation of the Human Head. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. Vol. 55. No. 4, p.110–125.
6. Balanis C. A. (1997) *Antenna Theory: Analysis and Design*, New York, Wiley and Sons.
7. Potekhin A. I. (1948) *Nekotorye zadachi difraktsii elektromagnitnykh voln* [Some problem of electromagnetic waves diffraction]. Moskow, Sovetskoe radio Publ., 136 p..
8. Watson G.N. and Berman V. S. eds. (1949) *Teoriya Besselevskikh funktsii, chast' 1* [The theory of Bessel functions, part 1]. Moskow, Inostrannaya literatura Publ., pp. 798.

*Найденко В. І., Саламатіна Н. І. Зменшення опромінення голови людини антенною мобільного телефону. Знайдені електромагнітні поля вібраторів. Розв'язано систему лінійних алгебраїчних рівнянь, і після цього знайдені амплітуди струмів. Побудовано графік залежності відношення сумарного поля трьох вібраторів до поля головного вібратора від відстані від головного вібратора. Показано, що опромінення голови може бути зменшено, знайдені розміри областей компенсації.*

**Ключові слова:** мобільний телефон, електромагнітні поля, амплітуди струмів, зменшення опромінення.

*Найденко В. І., Саламатіна Н. І. Уменьшения облучения головы человека антенной мобильного телефона. Найдены электромагнитные поля вибраторов. Решено систему линейных алгебраических уравнений, и после этого найдены амплитуды токов. Построено график зависимости отношения суммарного поля трёх вибраторов к полю главного вибратора от расстояния от главного вибратора. Показано, что облучение головы может быть уменьшено, найденные размеры области компенсации.*

**Ключевые слова:** мобильный телефон, электромагнитные поля, амплитуды токов, уменьшения облучения.

*Naydenko V. I., Salamatina N. I. Reducing irradiation human head by cellular phone antenna.*

*Introduction. Method of reducing irradiation human head by cellular phone antenna is*

*proposed in this paper. A method of solving this problem is called the compensation method. In this method an additional radiator is placed between the head and handset (main) radiator.*

*The results. In this work the electromagnetic fields were found. System of linear equation was solved and the currents of radiators were calculated. The boundary surface of the dark spot was found.*

*Conclusion. The characteristics of the compensation method for the creation of weak-field area in the near region of transmitting antenna were described. The dimensions of the weak-field area were determined, and the mutual coupling between the main and auxiliary antennas was analyzed. The results showed that under realistic condition the compensation method permits decreasing the irradiation power by a factor of 4 to 50. Methods of wideband field compensation will be separately considered.*

**Keywords:** *compensation method, mutual coupling, cellular phone antenna, dark spot, electromagnetic fields.*